



Fakulta lesnická
a dřevařská



Opravdu odlišná problematika?!

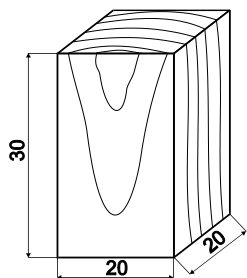
*(malé „ideální“ vzorky ×
konstrukční dřevo vs. strom)*

Přednáška (verze 10/2023)

doc. Ing. Vlastimil Borůvka, PhD., Dipl. Mgmt.



Odlišná problematika s podobným zaměřením, ale mnohdy „zcela“ odlišných chování materiálu, tj. dřeva obecně:

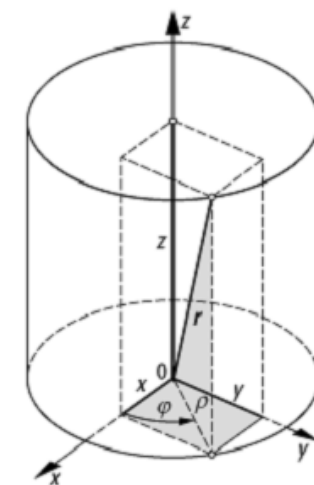
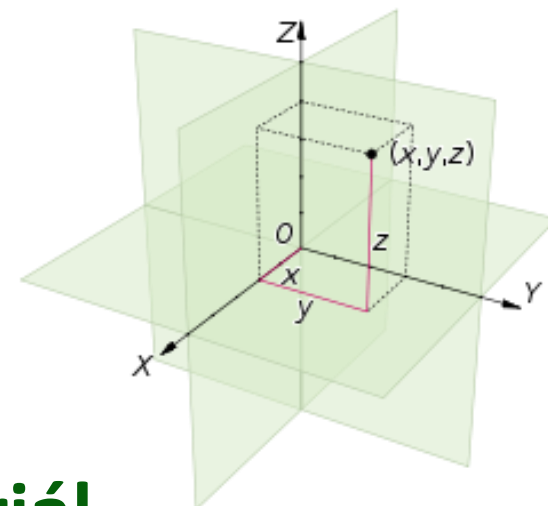


- malé ideální vzorky ze dřeva,
- dřevo konstrukčních rozměrů,
- dřevo „živých“ stromů.



Důvody:

- ✓ geometrie, rozměry, vady, ...
- ✓ ortogonální materiál vs. polárně ortotropní materiál,
- ✓ vázaná voda vs. navíc i volná voda (a její rozložení),
- ✓ zatěžovací stavy a podmínky prostředí,
- ✓ možnosti reakce (primárně strom!),
- ✓ ...



Ideální vzorky na testování mechanických vlastností dřeva

➤ Ortotropní vzorky

- ✓ Roční kruhy rovnoběžné s hranou
- ✓ Směr zatížení ve směru měřené vlastnosti

➤ Bez chyb:

- ✓ Trhliny (výsušné, odlupčivé, vnitřní)
- ✓ Suky
 - ❑ Lokální (suky nebo okolí suků)
 - ❑ Globální
- ✓ Odklon vláken

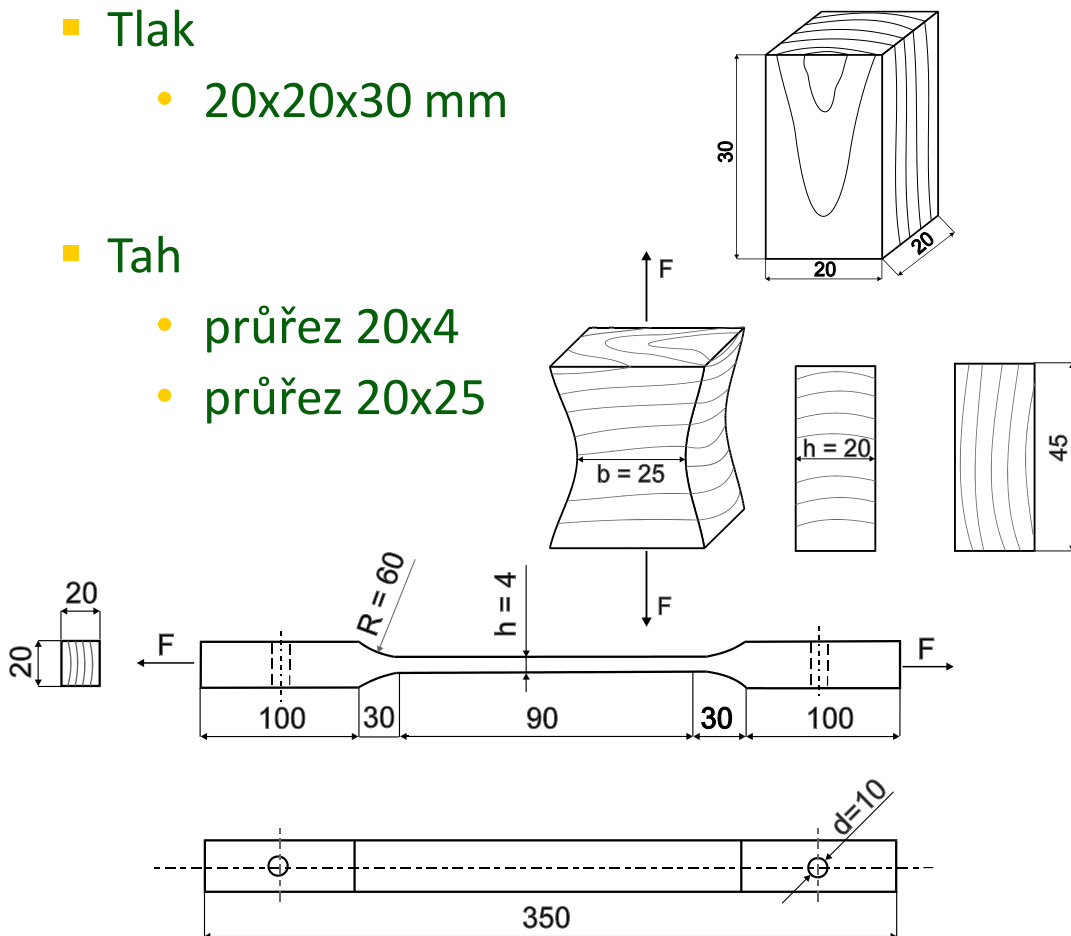
Ideální vzorky na testování mechanických vlastností dřeva

■ Tlak

- 20x20x30 mm

■ Tah

- průřez 20x4
- průřez 20x25



■ Smyk

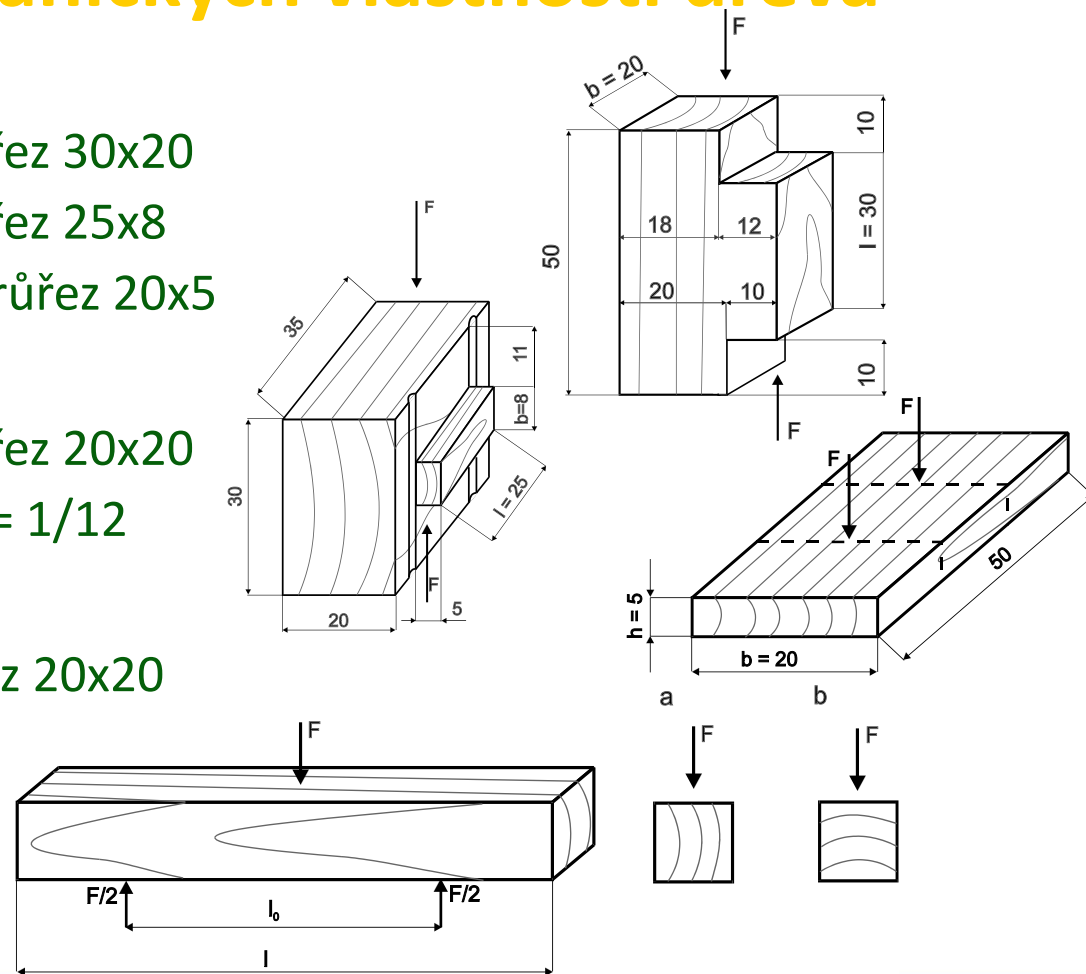
- průřez 30x20
- průřez 25x8
- 2xprůřez 20x5

■ Ohyb

- průřez 20x20
- $h:L = 1/12$

■ Krut

- průřez 20x20



Ideální vzorky vs. konstrukční dřevo

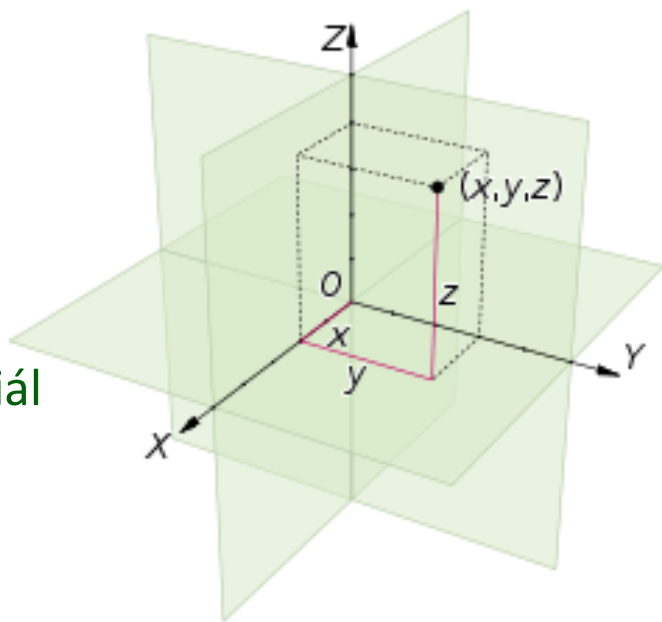
IDEÁLNÍ VZORKY

Pevnost a modul pružnosti ↗

Pevnost v tahu ↗

Pevnost v tlaku ↘

Ortogonální materiál



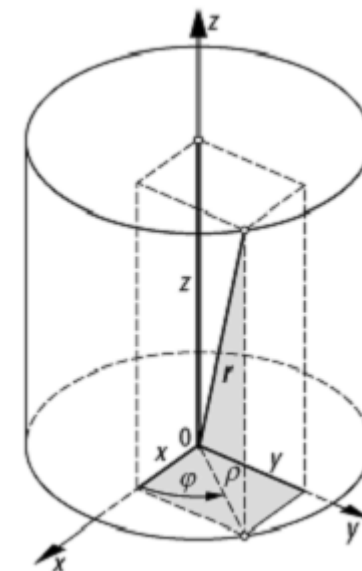
KONSTRUKČNÍ DŘEVO

Pevnost a modul pružnosti ↘

Pevnost v tahu ↘ (suky, odklon vláken)

Pevnost v tlaku ↗ (suky)

Polárně ortotropní materiál



Statistika – opakování

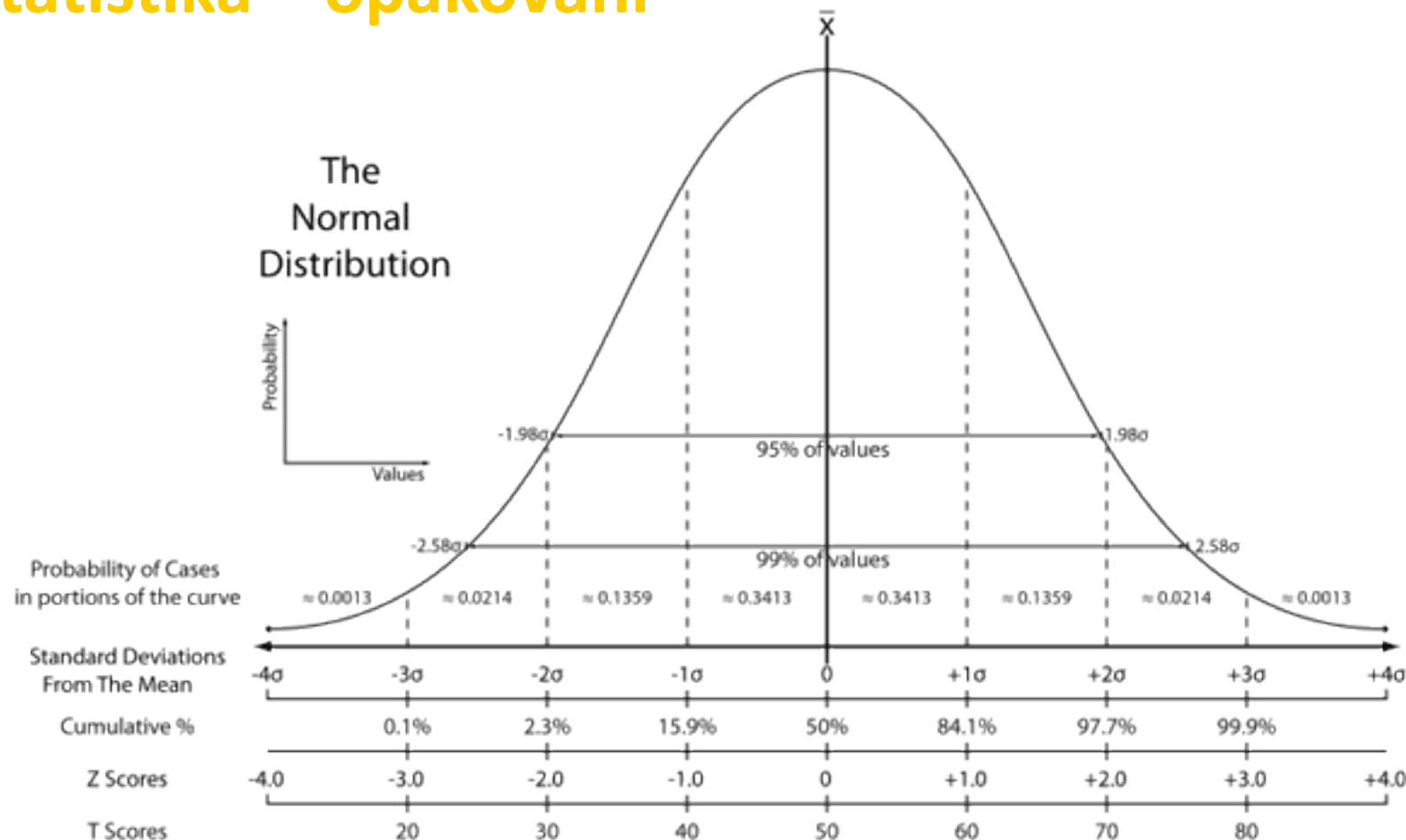
■ Normálové / Gaussovo rozdělení

- Průměr $\bar{x}$ (μ)
- Směrodatná odchylka s
- 5% kvantil

$$x_{05} = \bar{x} - 1,654 \cdot s$$

- Histogram (graf početnosti) normálového rozdělení

$$f(t) = \frac{1}{\sigma(2\pi)^{\frac{1}{2}}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{t - \mu}{\sigma} \right)^2 \right]$$



Statistika – opakování

■ Weibullovo rozdělení

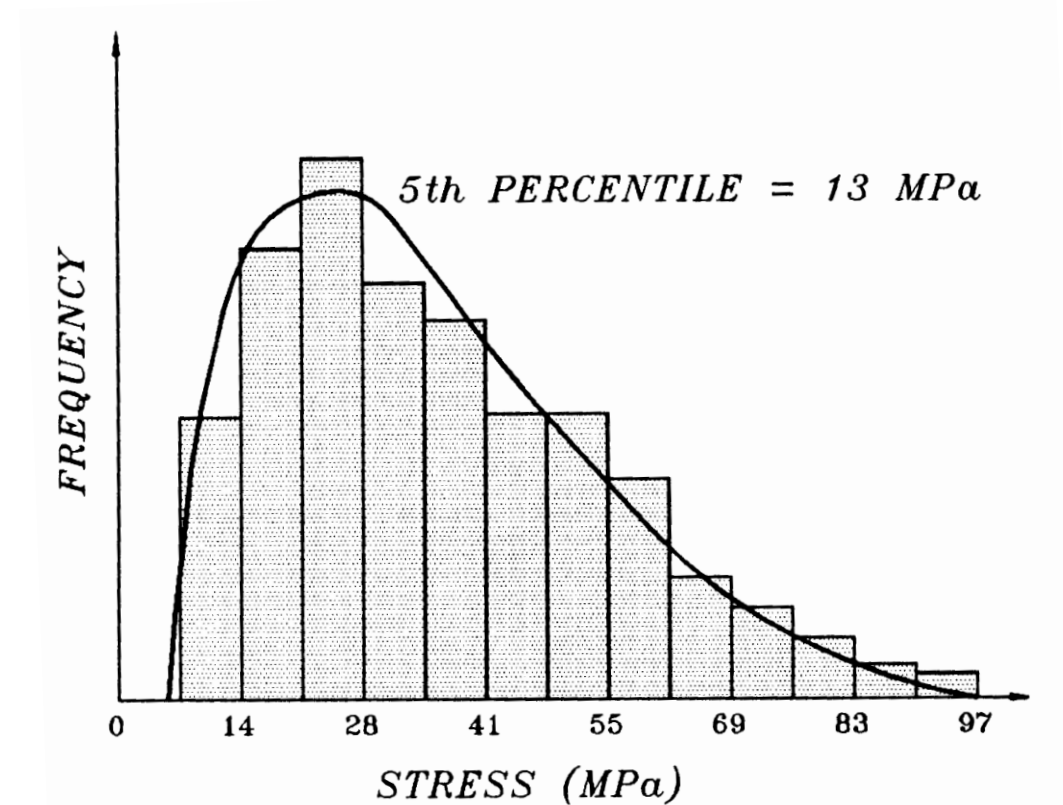
- Modus $\bar{x}$
- 5% kvantil kde $F=0,05$,

$$F(x; k, \lambda) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{\lambda}\right)^k}$$

- Graf početnosti Weibullova rozdělení

$$f(x; \lambda, k) = \begin{cases} \frac{k}{\lambda} \left(\frac{x}{\lambda}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{x}{\lambda}\right)^k}, & x \geq 0, \\ 0, & x < 0, \end{cases}$$

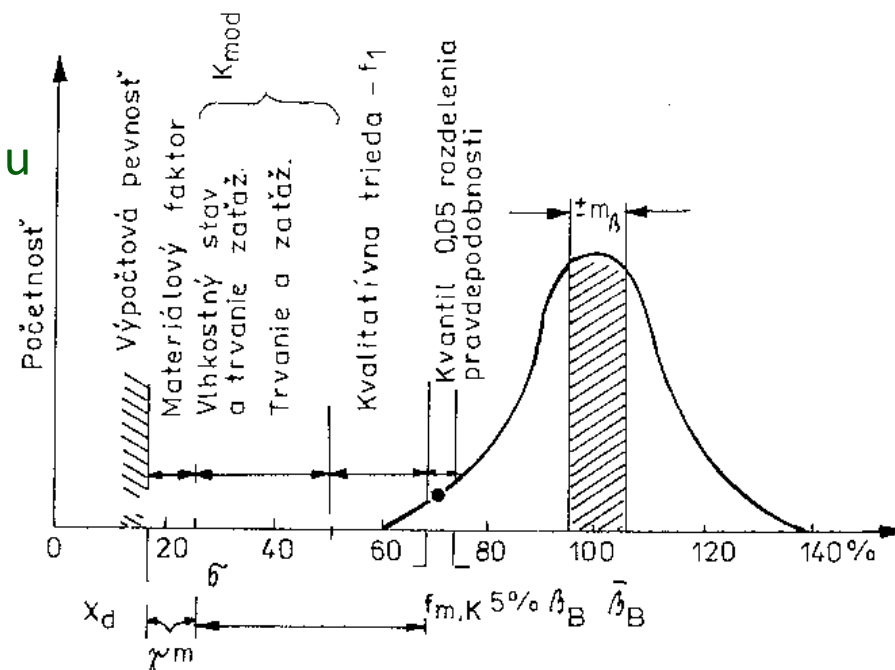
- k - parametr tvaru
- λ - parametr škálování



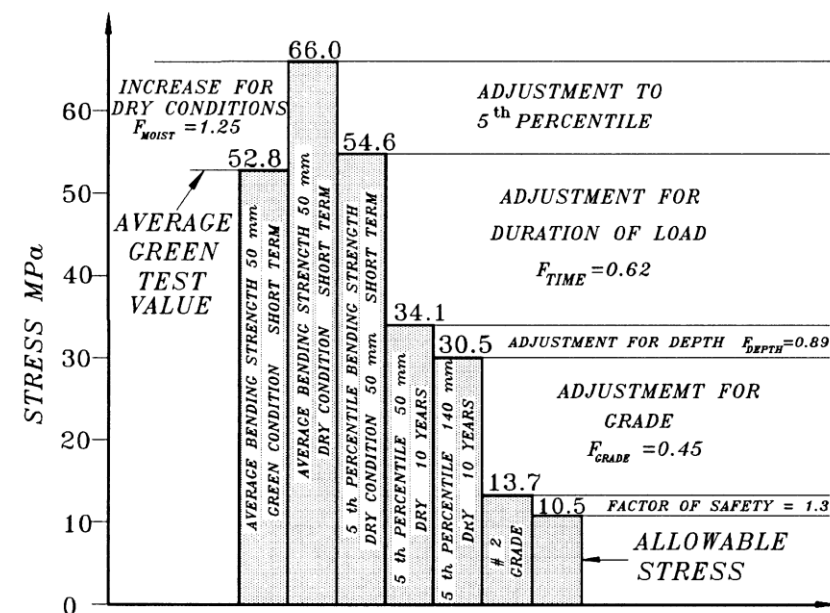
Výpočtová pevnost – minulost

Průměr z ideálních vzorků

- 1,645s (jaké rozložení dat se předpokládá?)
- vliv třídění
- vliv doby zatížení
- vliv vlhkosti
- vliv spolehlivosti materiálu



Podobný výpočet používali, a ještě stále z části používají, v US a Kanadě.



Nedostatky ideálních vzorků

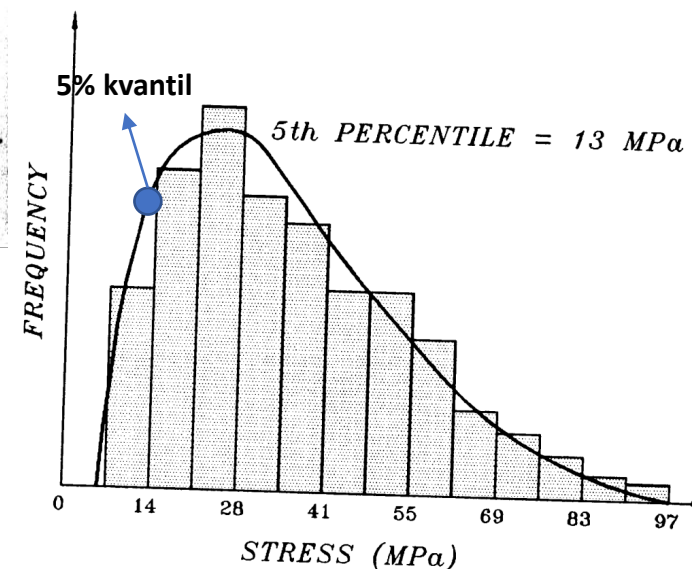
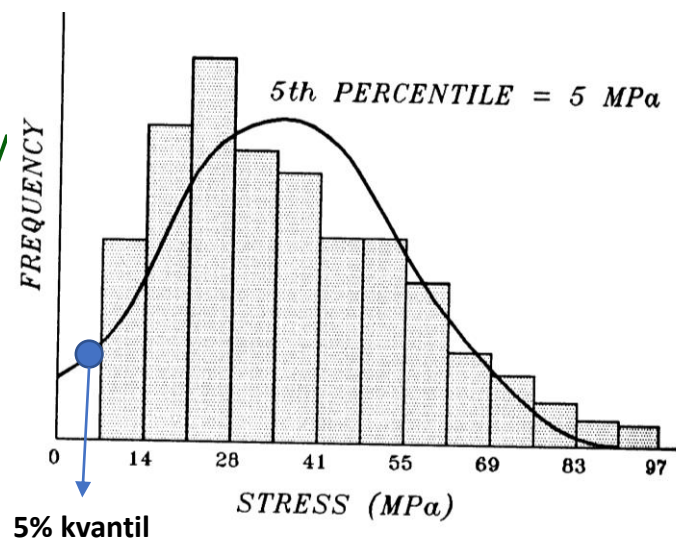
Rozdělení a 5% kvantil

Vzorek se skládal z 240 tělísek (desek) z douglasky

- Rozměr 38x140x3660 mm
- Testované v ohybu (4 bodový ohyb)
- Vzdálenost podpěr 3000mm

Výsledky

- | | |
|------------------------|----------------------|
| ■ Průměrná pevnost | 35,8 MPa |
| ■ Standardní odchylka | 18,7 MPa |
| ■ 5% kvantil (Gauss) | 5,0 MPa |
| ■ 5% kvantil (Weibull) | 13,3 MPa (2,7x více) |



Nedostatky ideálních vzorků

Doba zatížení (budeme se tomu věnovat v samostatné přednášce
- na teď pouze náznak)

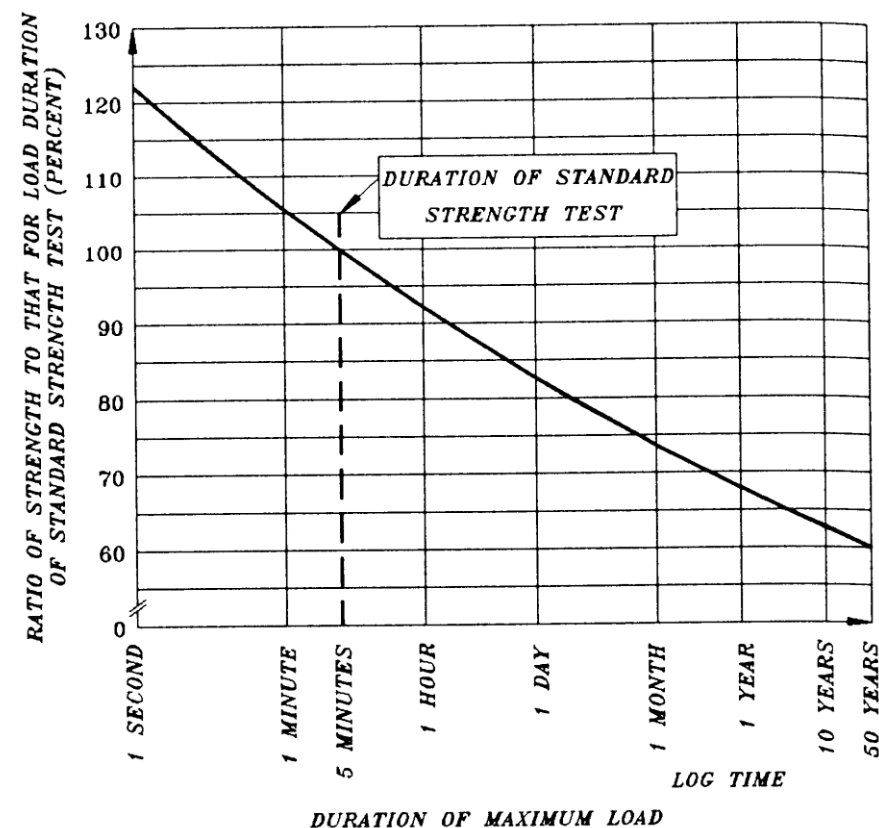
Madissonova křivka (vytvořená v roce 1951)

Vzorek ze 128 ideálních tělísek

- Rozměr 25x25x400 mm
- Zatížené do úrovně 95%, 90%, ... 65% a 60% z pevnosti (8 úrovní po 16 tělískách)
- Vlhkost 6%, 12% a termicky upravené

Výsledek

- Redukce pevnosti po 10 rocích zatížení 62%!
 - Doted' používá Eurokod 5 tyto výsledky
 - $k_{\text{mod}} = 0,6$ (pro stále zatížení, třída použití 1)



Nedostatky ideálních vzorků

Doba zatížení

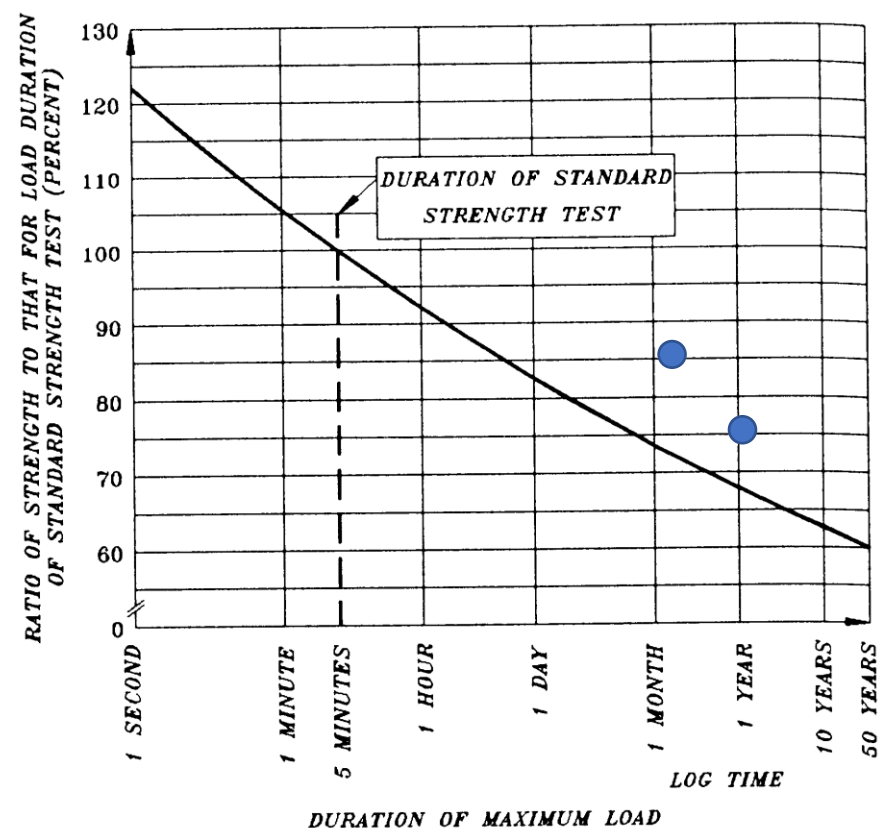
1975: podobný experiment na konstrukčním dřevu

Vzorek z 2 800 tělísek

- Rozměr 38x140x3600 mm
- Zatížení a vlhkost podobné jako v roce 1951

Výsledek

- Madisonova křivka není platná pro konstrukční dřevo!
- 5% kvantil pevnosti po 2 m. 85% z pevnosti (po 1 roce 75%, koncept ideálních vzorků je konzervativní pro zatížení do 1 roku, není konzervativní pro dlouhodobé zatížení)
- Pevnější materiál byl více ovlivněný časem zatížení než méně pevný zatížený tím samým % z pevnosti!



Nedostatky ideálních vzorků

Vliv vlhkosti

Ideální vzorky: změna vlhkosti o 1% = změna pevnosti o 4%
(poznáte to z koeficientu přepočtu pevnosti v ohybu na 12%, $\alpha = 0,04$)

Eurokod 5 definuje třídy použití 1, 2, 3

- Do 12%, do 20%, nad 20%

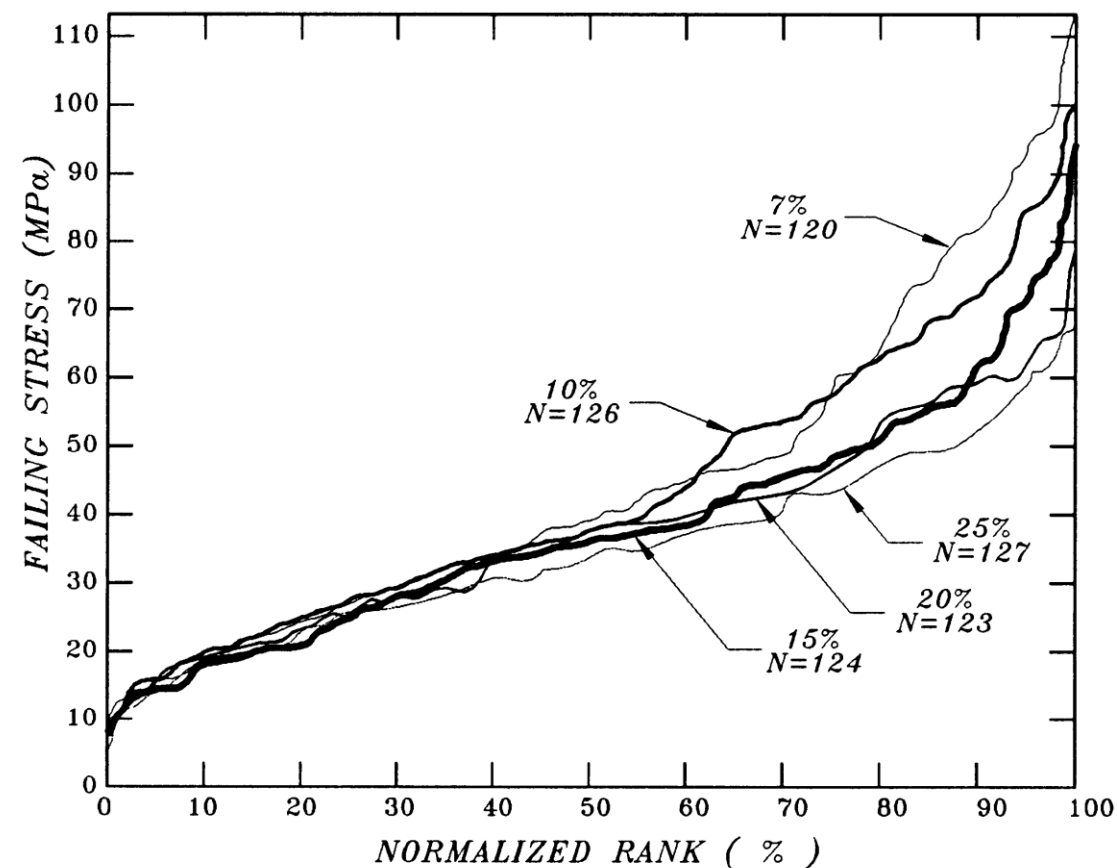
Test: Konstrukční dřevo (douglaska, třída 2):

Vzorek ze 625 tělísek

- Rozměry 38x140 mm
- Vlhkost 7, 10, 15, 20, a 25%

Výsledek

- Vlhkost neovlivní hodnotu 5% kvantilu pevnosti!



Nedostatky ideálních vzorků anebo jak vydělat první milión!

Vliv kvality

Přepočítání z ideálních vzorků na reálné
(po staré kvalitativní třídě f_1)

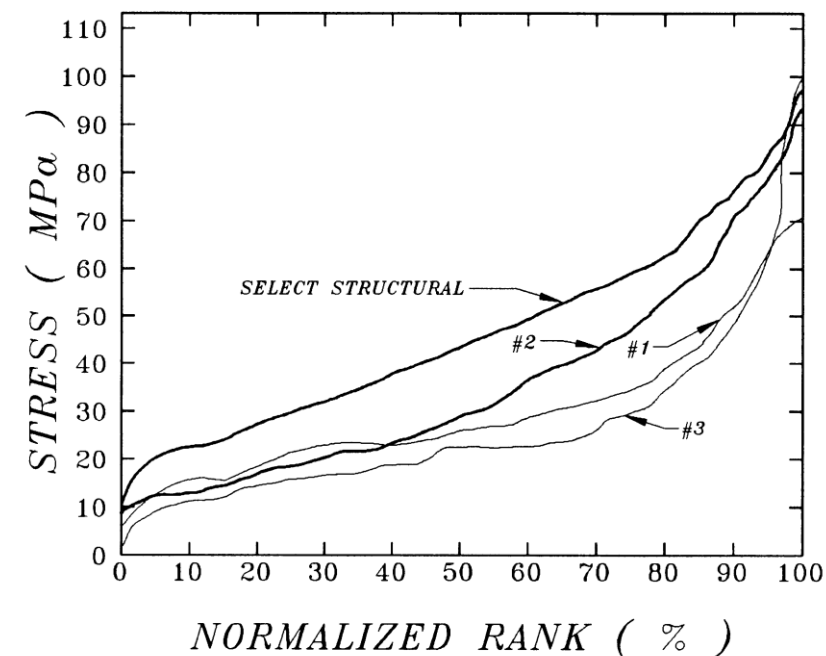
Test vizuálně tříděných vzorků

- 4 kvalitativní třídy (SS, 1, 2 a 3)
- Různé druhy dřevin



Výsledek

- Dřeviny s malými suký $\nearrow$ pevnost než dřeviny s velkými málopočetnými suký
- Vizuální třídění nezohledňovalo:
 - Vliv suků na kvalitu, která závisí od dřeviny.
 - Početnost suků, která významně ovlivní pevnost
- f_1 nevystihuje reálné chování se vizuálně tříděných desek
- Kosmetická kritéria (twist, cup, crook a jiné) nemají vliv na pevnost, ale pouze na vzhled
- Třídy 1 a 2 mají takřka stejný kvantil x_{05}
- Nejlepší kvalita: $x_{05} = 20$ MPa (všimněte si množství pevného materiálu s pevností vyšší než 40 MPa, což vizuální třídění nezachytí!!!)



Nedostatky ideálních vzorků

Vliv spolehlivosti materiálu

Toto není dané experimentálně – je to inženýrský odhad

Paradox

- Ocel, beton (1,6-2,0)
- Dřevo: **1,3** (zjišťovaný z výsledků ideálních vzorků), doteď se používá i pro konstrukční dřevo

U dřeva jednoduše nevíme proč 1,3 ano, ani proč 1,3 ne

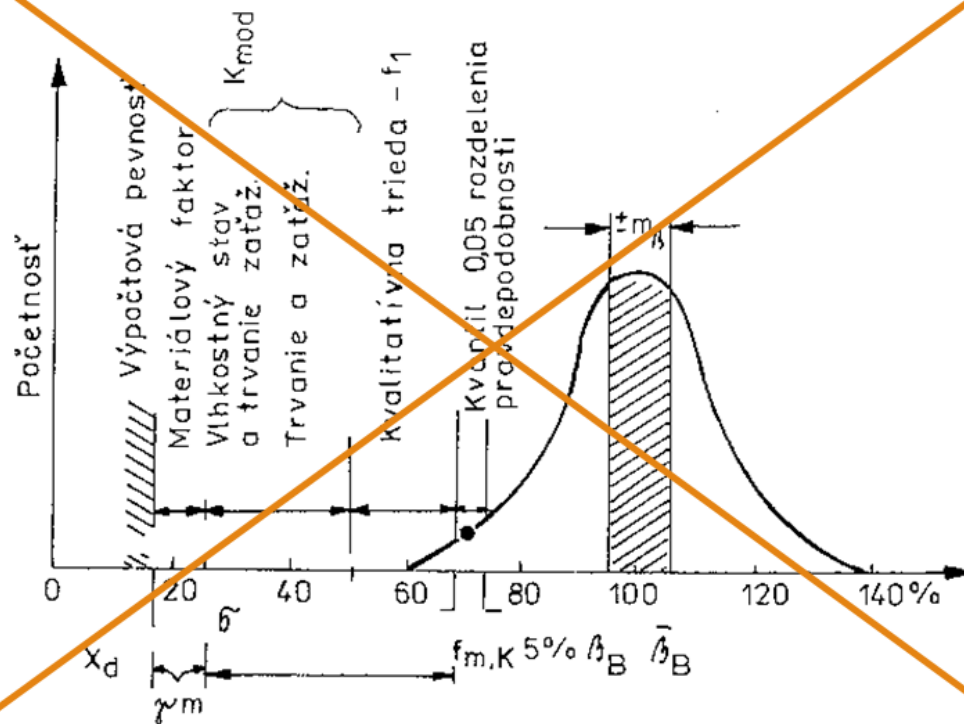
- Výzva pro další výzkum!

Shrnutí

Chování se

chování s

Konstru
považ



žního dřeva

ch vzorků.

se musí
iály!!!

Shrnutí anebo co s tím?

Problémem je zjistit hodnoty vlastností konstrukčního dřeva, a to takové, které nejlépe specifikují vlastnosti **používaného** dřeva.

Jednoduše řečeno, jestliže chceme používat řezivo o průřezu 40x250, tak

- Testujme jeho vlastnosti při rozměru 40x250 nebo
- Vylepšeme faktory upravující vlastnosti ideálních vzorků (tento přístup se historicky vytrácí)
 - Může dřevo, které se v ohybu poruší v tlaku (ideální vzorky) charakterizovat materiál, který se takřka vždy poruší v tahu (konstrukční dřevo)?

Odpovědí je:

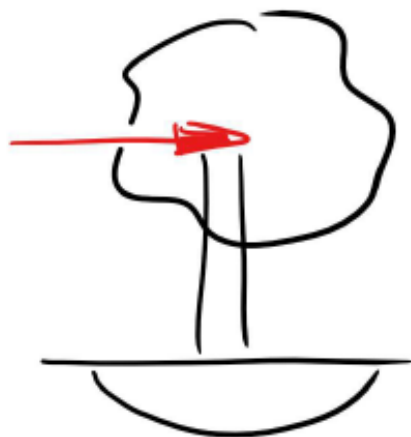
- Návrhová metoda limitních stavů (LSDM – Limit States Design Method) za pomoci selektivního zkoušení (In-Grade testing nebo Proof grading) nebo zjišťování charakteristických hodnot pomocí EN408.



Drobné výňatky z problematiky biomechaniky dřevin

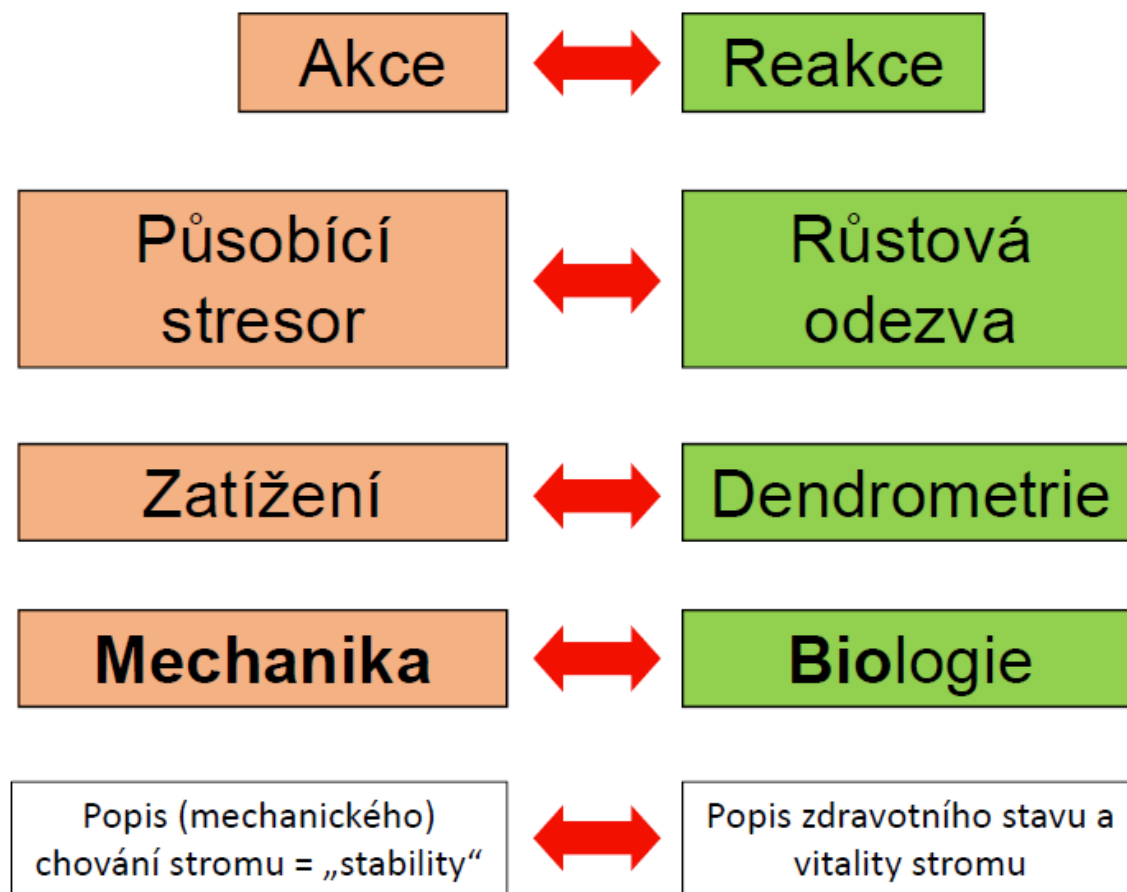
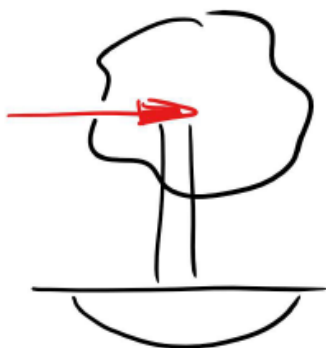
.....

BioMechanika stromu



- stanovení pravděpodobnosti **zlomení** stromu (selhání **kmene / větví**) = nadzemní biomasa
- stanovení pravděpodobnosti **vyvrácení** stromu (selhání **kořenového systému**) = podzemní biomasa

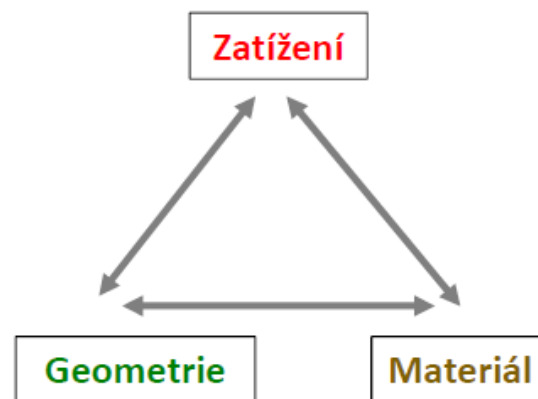




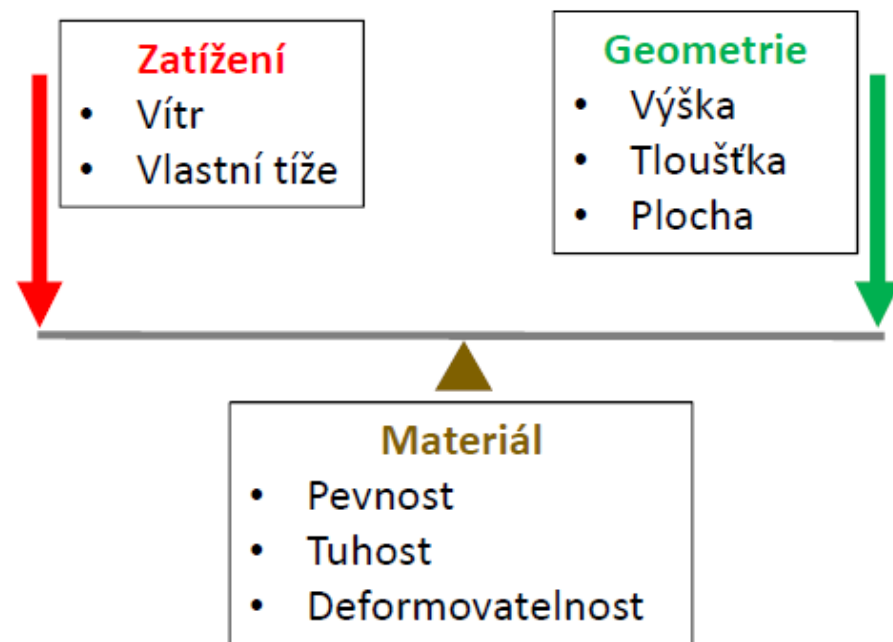
Základní koncept = **rovnováha** mezi složkami systému

Složky systému

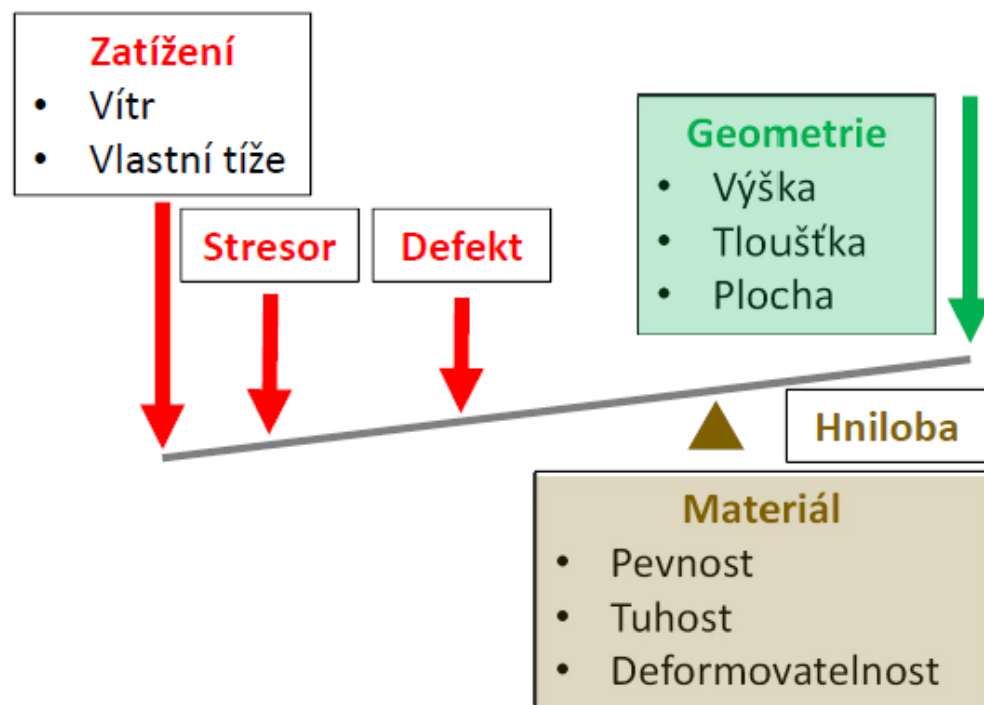
- **Zatížení** – stresor
- Dendrometrie – **geometrie** – růstová reakce
- **Materiál** – vlastnosti pletiv – vlastnosti dřeva



Základní koncept = rovnováha mezi složkami systému



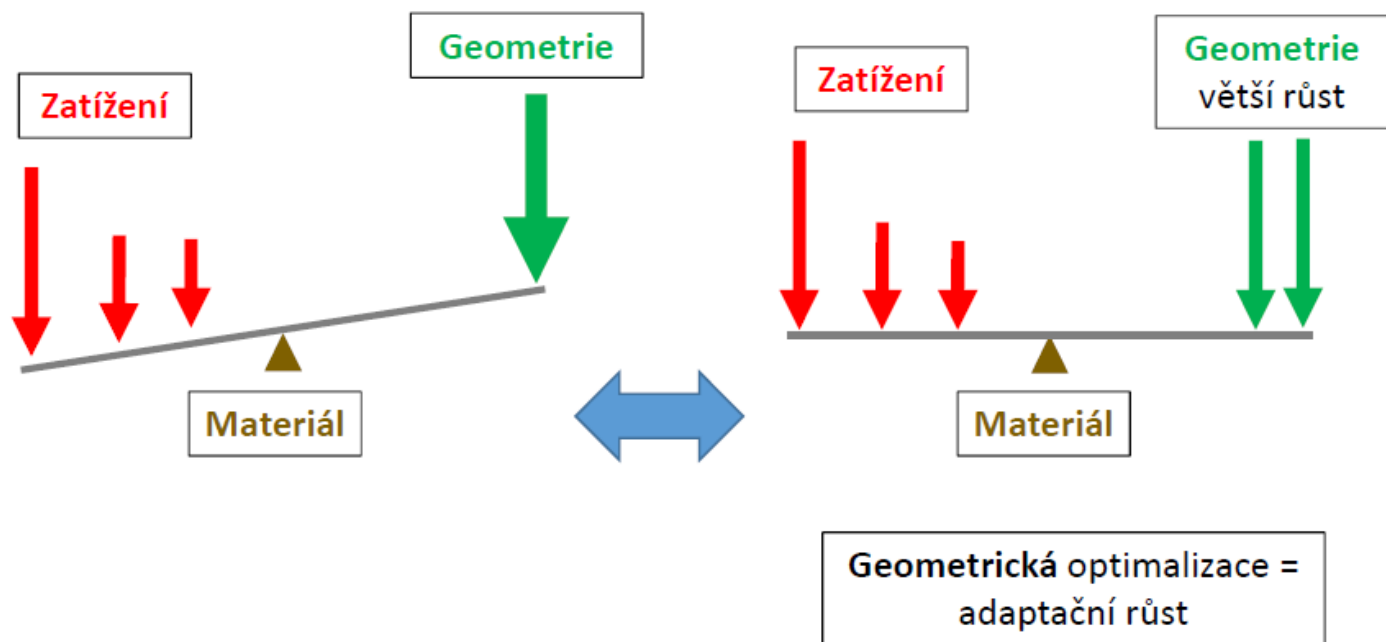
Základní koncept = nerovnováha mezi složkami systému



Základní koncept = **nerovnováha** mezi složkami systému



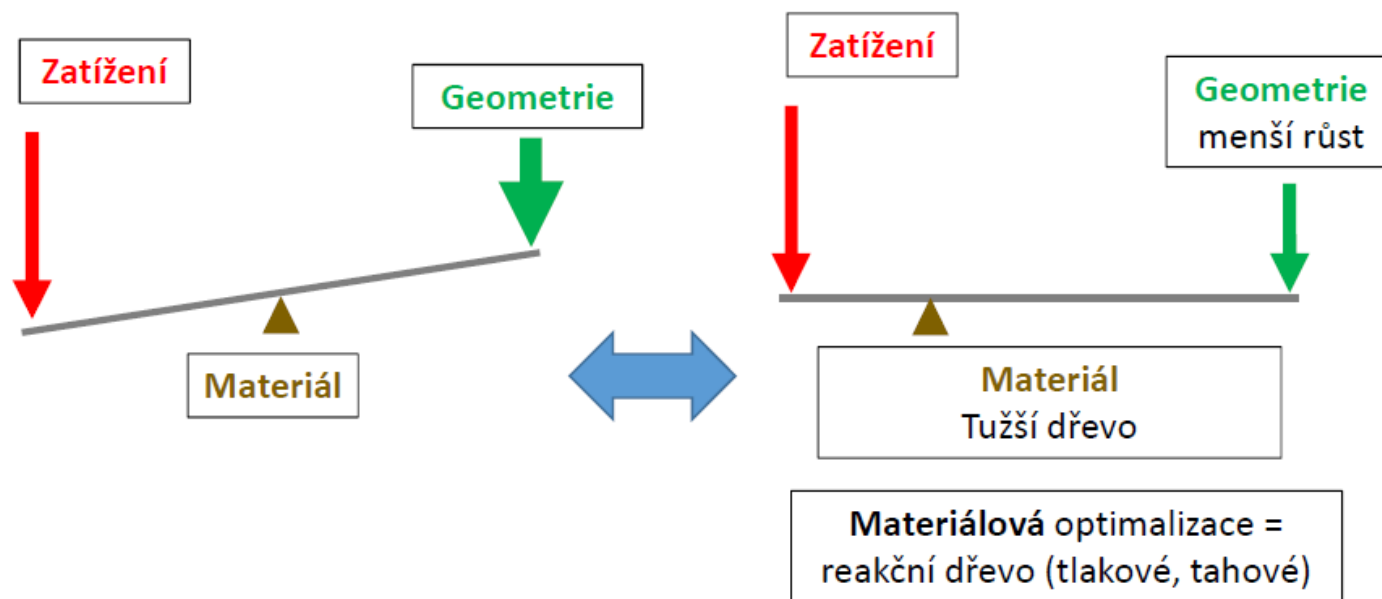
rovnováha mezi složkami systému



Základní koncept = **nerovnováha** mezi složkami systému

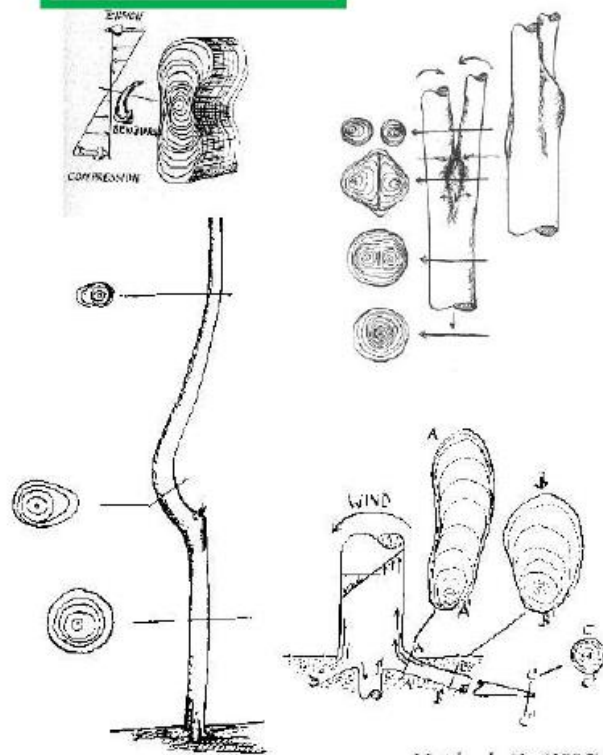


rovnováha mezi složkami systému





Tvarová optimalizace

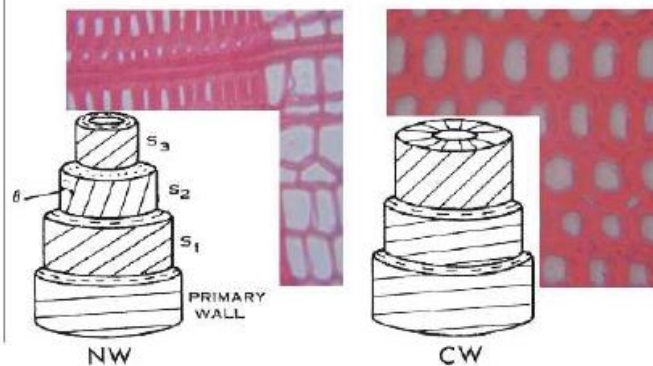


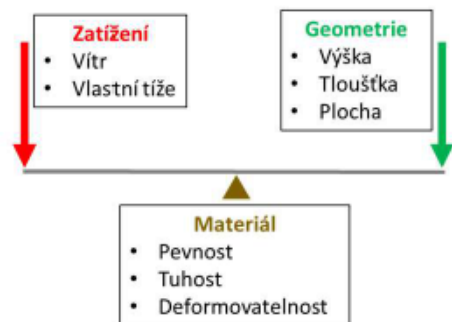
Mattheck, C. (1995)

Materiálová optimalizace



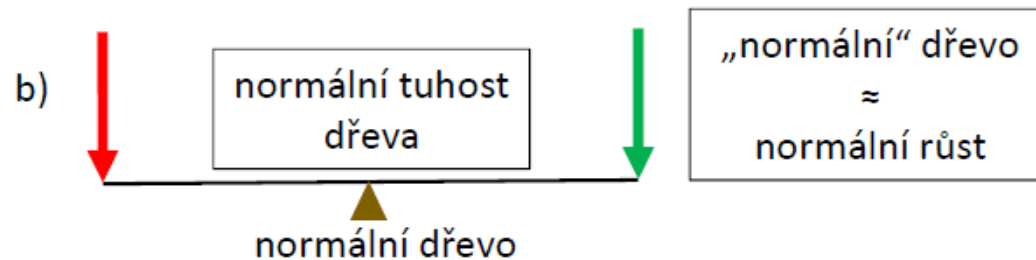
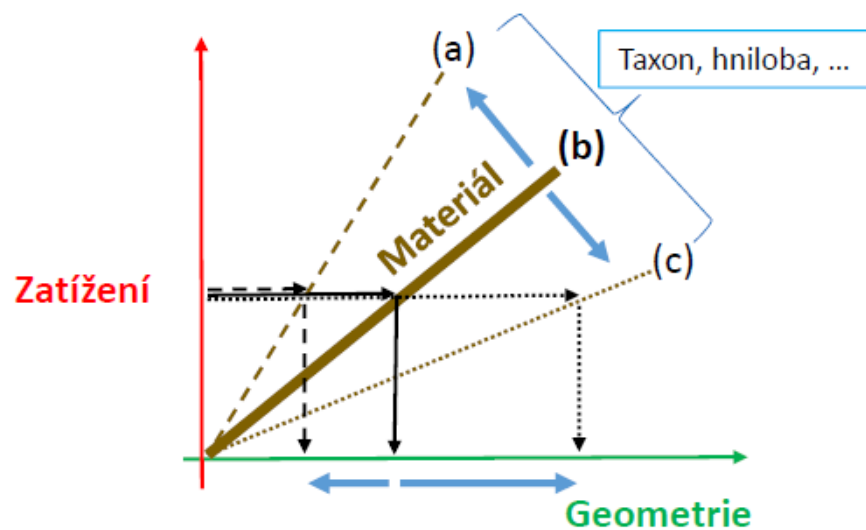
R.J.Astley et al.

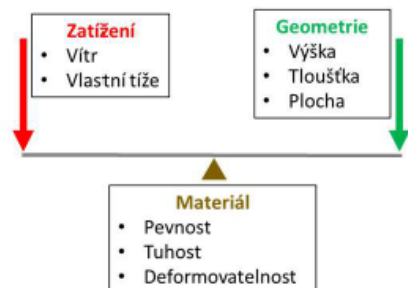




$$y = a \cdot x$$

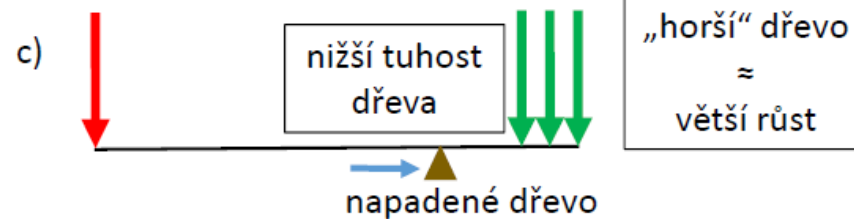
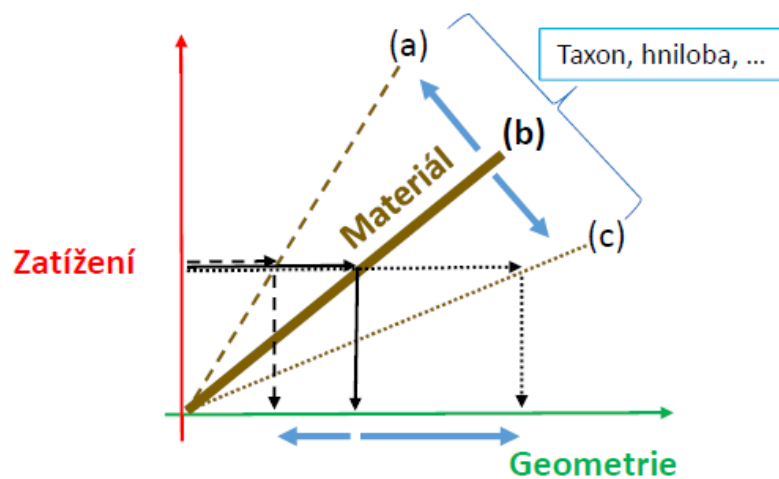
$$\text{Zatížení} = \text{Materiál} \cdot \text{Geometrie}$$

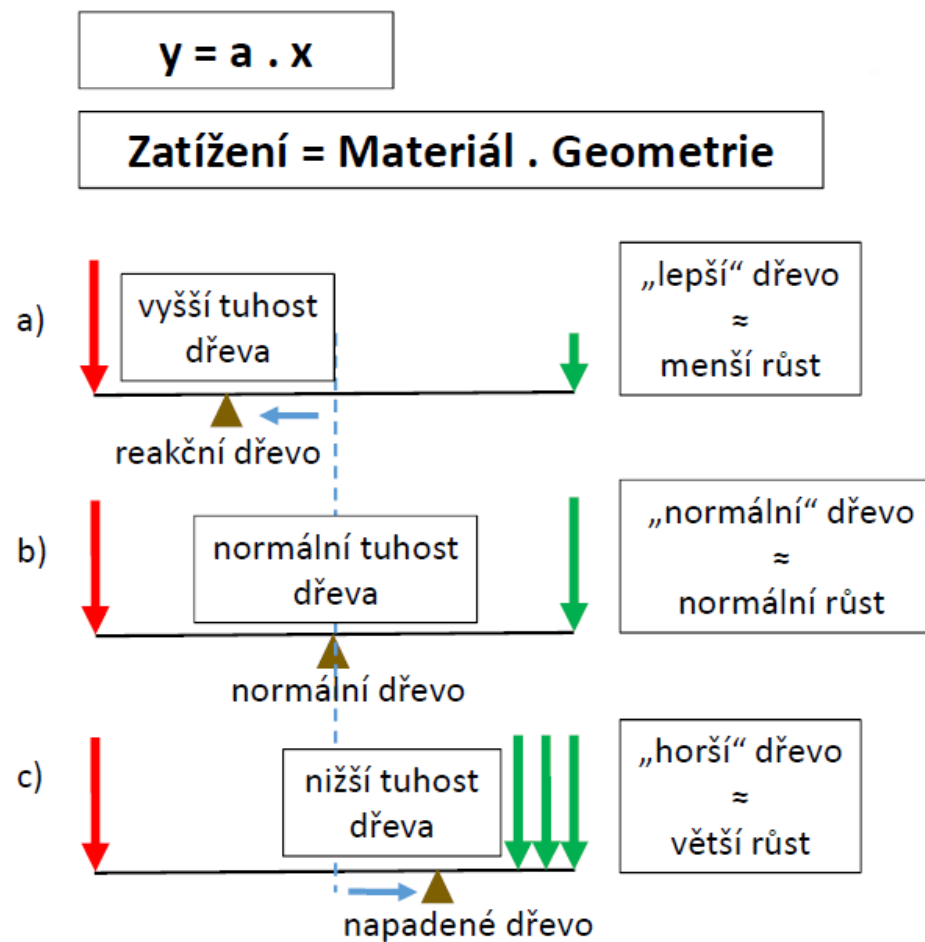
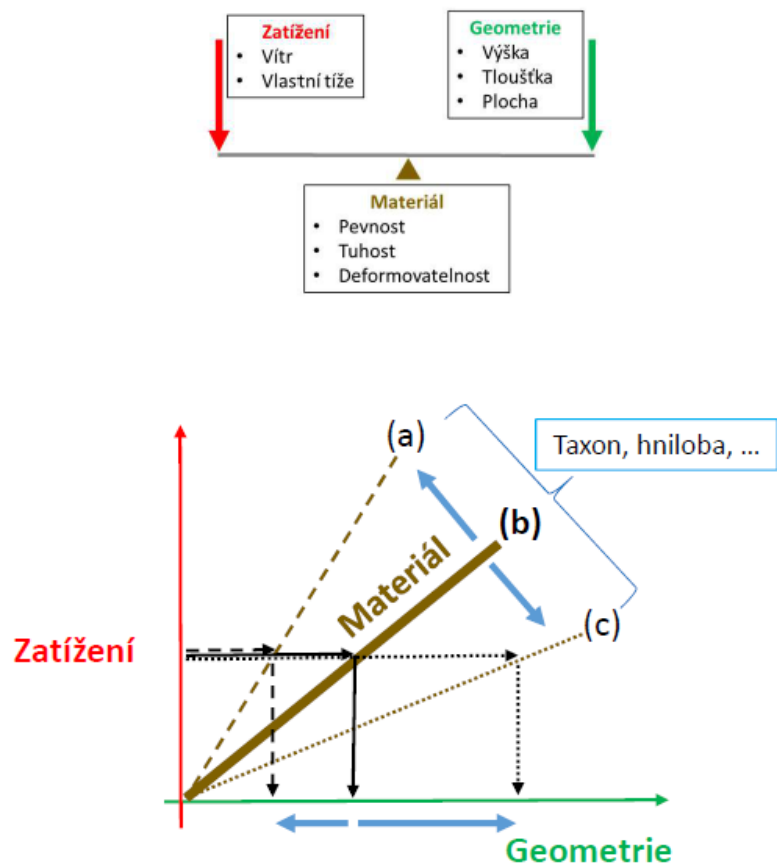


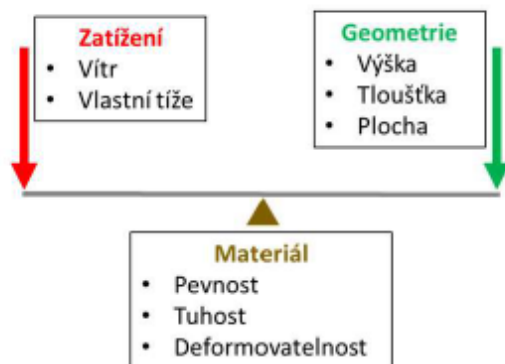


$$y = a \cdot x$$

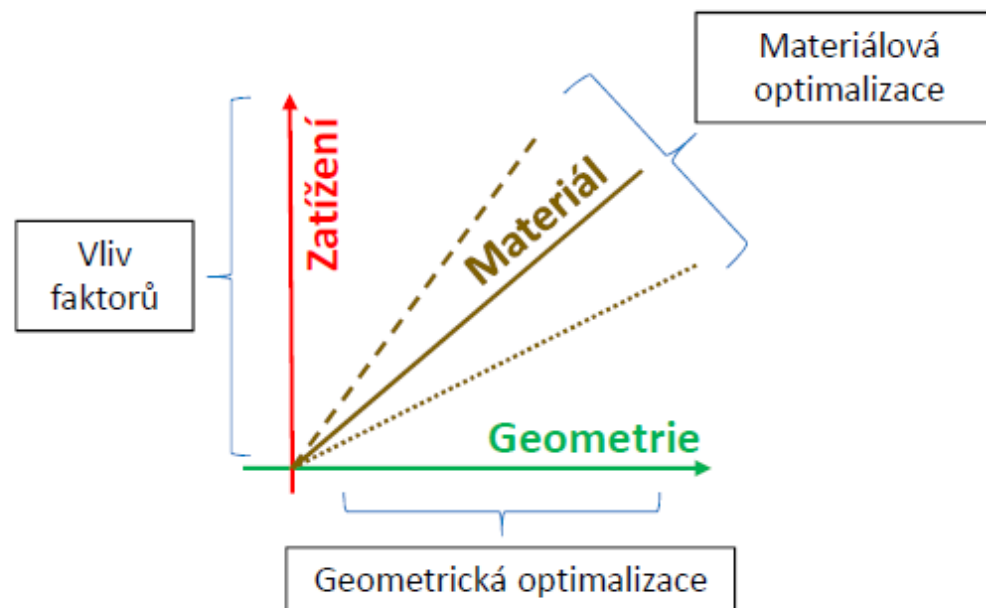
$$\text{Zatížení} = \text{Materiál} \cdot \text{Geometrie}$$

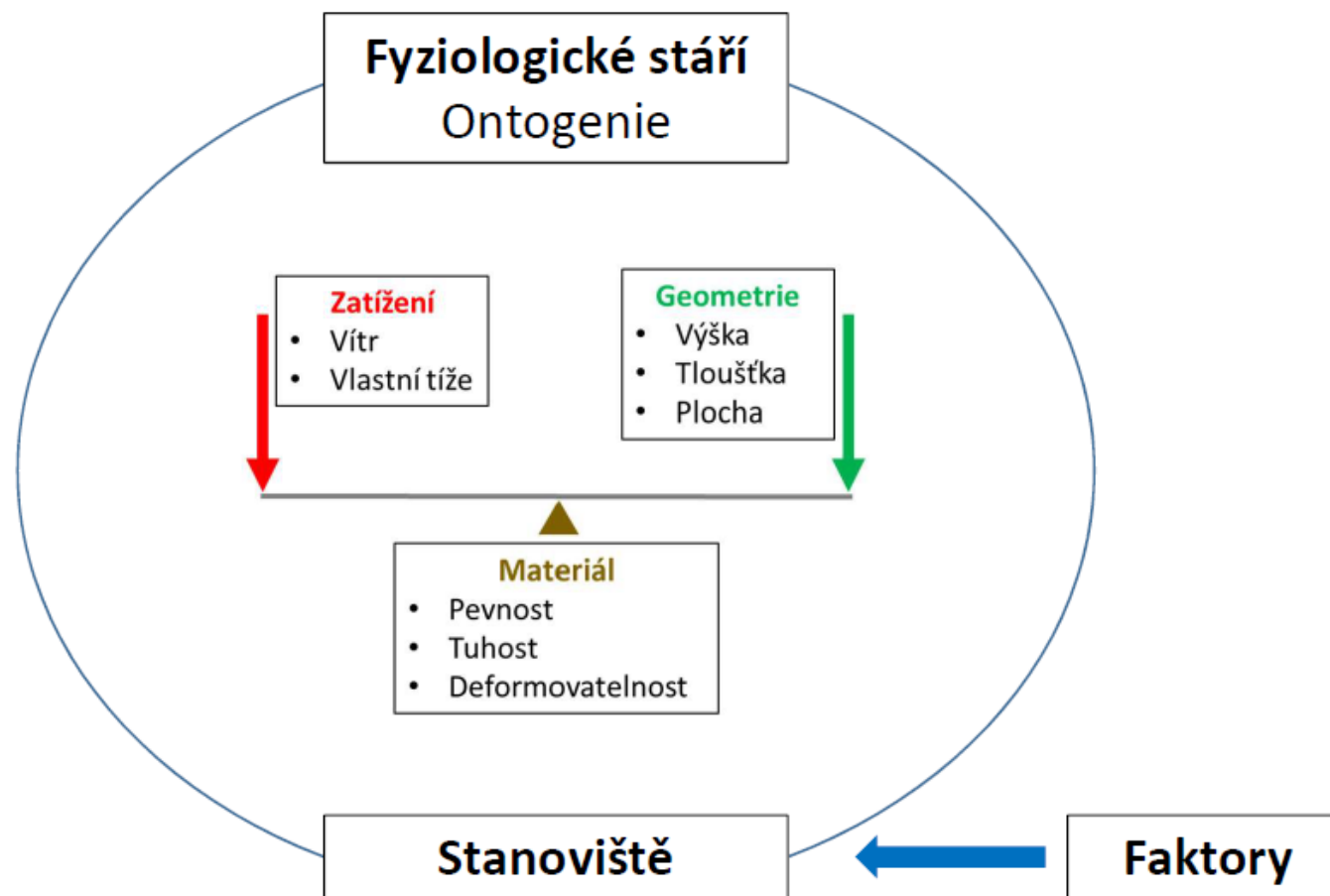


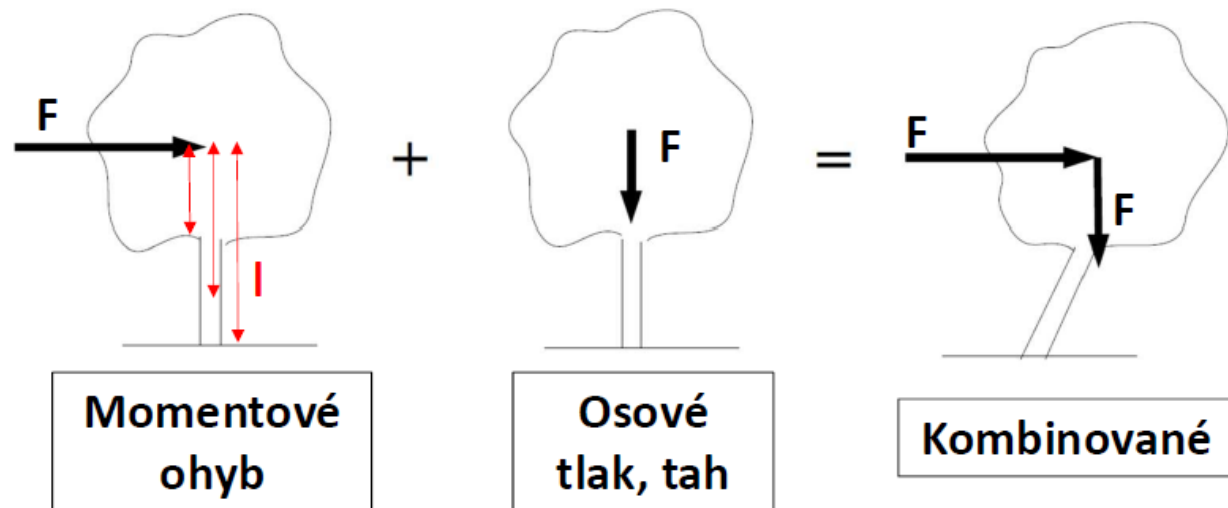




$$\text{Zatížení} = \text{Materiál} \cdot \text{Geometrie}$$







$$M = F l$$

M – ohybový moment (N.m)
F – síla větru (N)
l – výška těžiště koruny (m)

$$F = 0,5 \rho A c v^2$$

A – plocha koruny (m²)
ρ – hustota vzduchu (kg.m⁻³)
c – prodouvavost koruny (-)
v – rychlost větru (m.s⁻¹)

$$F = m g$$

F – síla (N)
m – hmotnost koruny, kmene (g)
g – tíhové zrychlení (m.s⁻²)

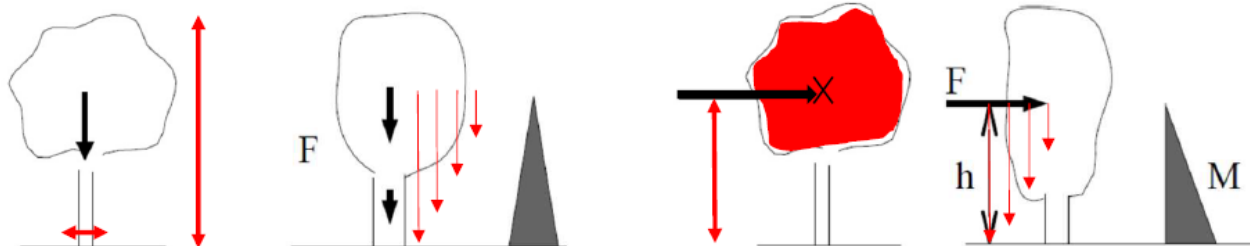
$$m = V \rho$$

V – objem koruny, kmene (m³)
ρ – hustota dřeva (kg.m⁻³)



Fakulta lesnická
a dřevařská

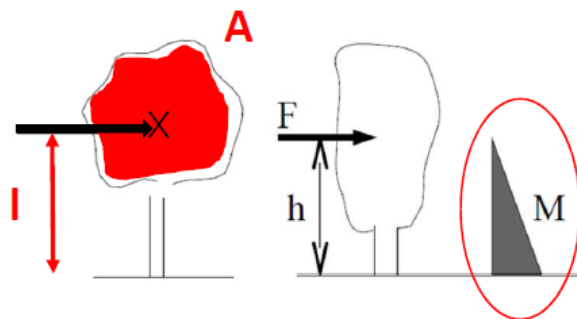




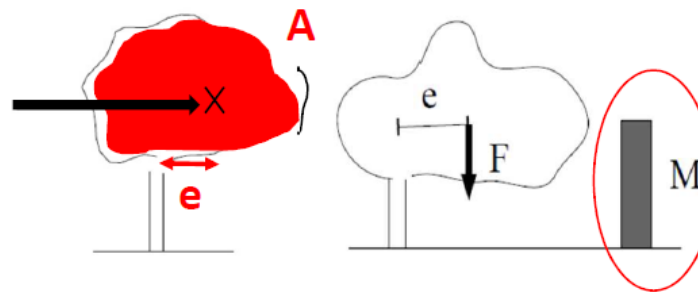
vlastní hmotnost		
vnitřní síla		
ρ (hustota dřeva)	900	kg.m-3
g (tih. zrychlení)	9,81	m.s-2
h (vyska)	20	m
d (tloušťka)	0,5	m
S (plocha)	0,196	m2
V (objem)	2,6	m3
m (hmotnost kmene)	2 297	kg
m (hmotnost koruny)	689	kg
F (síla)	29 297	N

vítr		
vnější síla		
v (rychlost vzduchu)	30	m.s-1
ρ (hustota vzduchu)	1,2	kg.m-3
c (prodouvavost koruny)	0,2	-
l (teziste)	13	m
A (plocha koruny)	100	m2
F (síla vetru)	10 800	N
M (ohybovy moment)	140 400	N.m

Zatížení = **Materiál** . **Geometrie**

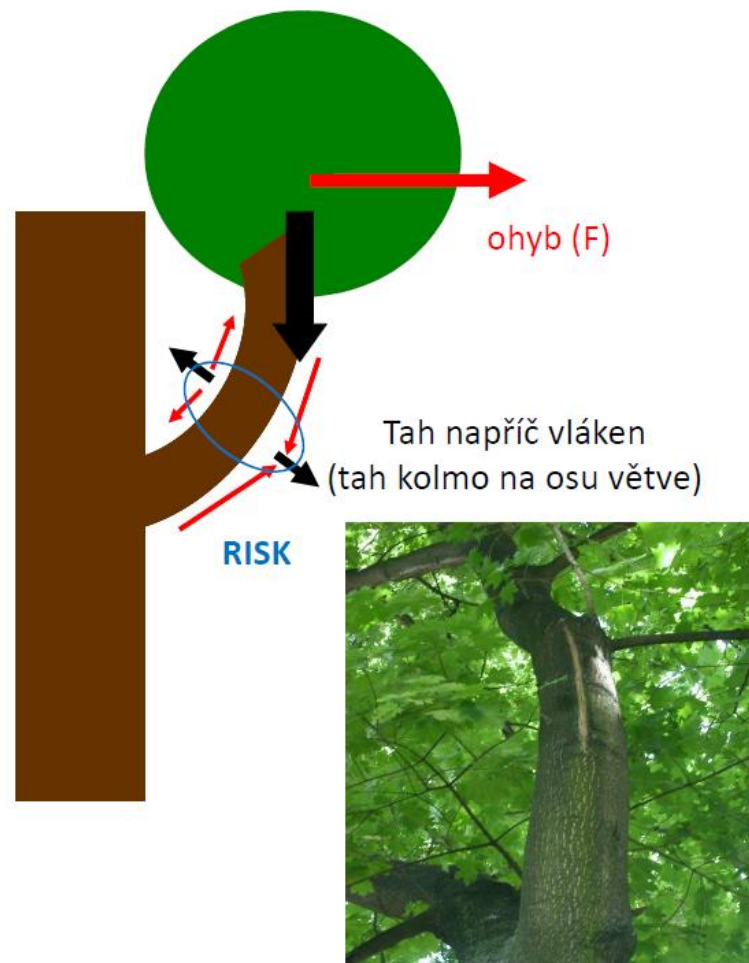
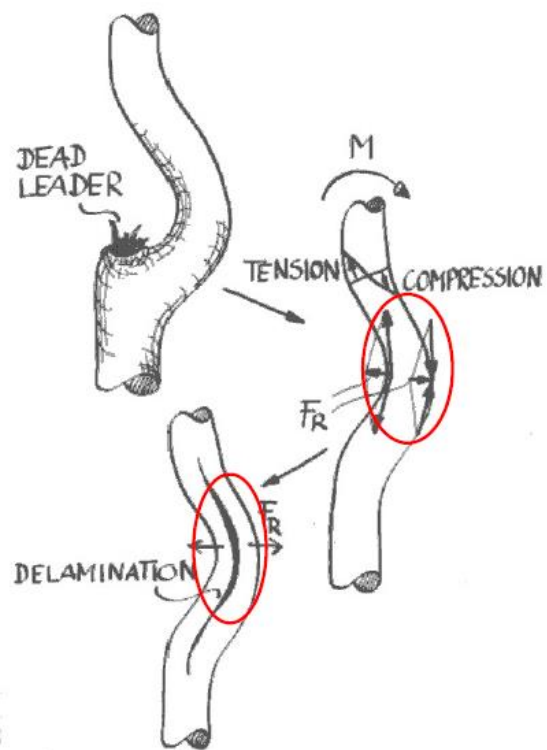


vitr - ohyb		
vnější síla		
v (rychlost vzduchu)	30	m.s-1
ρ (hustota vzduchu)	1,2	kg.m-3
c (prodouvavost koruny)	0,2	-
l (teziste)	13	m
A (plocha koruny)	100	m2
F (síla vetru)	10 800	N
M (ohybovy moment)	140 400	N.m



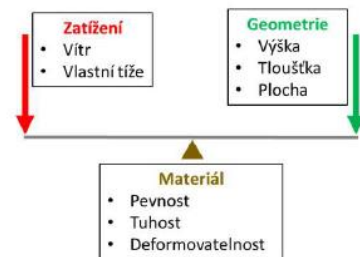
vitr - krut		
vnější síla		
v (rychlost vzduchu)	30	m.s-1
ρ (hustota vzduchu)	1,2	kg.m-3
c (prodouvavost koruny)	0,2	-
e (excentricita teziste)	2	m
A (plocha koruny)	100	m2
F (síla vetru)	10 800	N
M (ohybovy moment)	21 600	N.m

Zatížení = **Materiál** . **Geometrie**



- 1) Materiál – návrhová hodnota ($\sigma_{\max}$, $\phi_{\max}$)
- 2) Zatížení – momentové, *osové* (M , F)
- 3) Geometrie – (W , A)
- 4) Napětí ($\sigma = M/W$, $\sigma = F/A$)
- 5) Náklon ($\phi = \alpha M/Et^3$)
- 6) Faktor bezpečnosti proti zlomu ($SF_{\text{zlom}} = \sigma_{\max}/\sigma$)
- 7) Faktor bezpečnosti proti vývratu ($SF_{\text{vývrat}} = \phi_{\max}/\phi$)

Složky stability
stromu

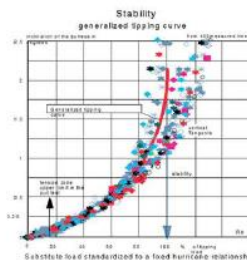
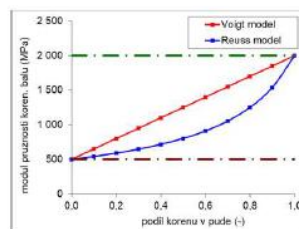
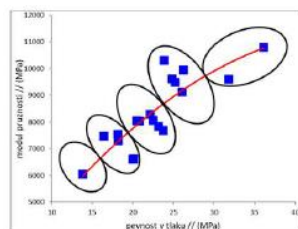


$$\begin{aligned}\sigma_{\text{větev}} &= 10 - 30 \text{ MPa} \\ \sigma_{\text{kmen}} &= 15 - 35 \text{ MPa} \\ \sigma_{\text{kořen}} &= 15 - 35 \text{ MPa}\end{aligned}$$

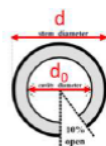
$$\begin{aligned}E_{\text{kmen}} &= 6\,000 - 11\,000 \text{ MPa} \\ E_{\text{kořen}} &= 2\,000 - 4\,000 \text{ MPa} \\ E_{\text{půda}} &= 1 - 500 \text{ MPa}\end{aligned}$$

$$E_{\text{koren.bal}}$$

$$\phi_{\text{pata kmene}} = 1,2^\circ - 2,25^\circ$$



Zatížení = Materiál . Geometrie



Selhání **zlomem**



$$M = \sigma W$$

$$0,5 c \rho A v^2 l = \sigma \frac{\pi (d^4 - d_0^4)}{32 d}$$

$$\frac{A l d}{(d^4 - d_0^4)} = \frac{\pi \sigma}{16 c \rho v^2}$$

$$\text{Geometrie} = \frac{\text{Materiál}}{\text{Faktory}}$$

Selhání **vývratem**



$$M = E_{koren.bal} \frac{t^3}{\alpha} \phi$$

$$0,5 c \rho A v^2 l = E_{kb} \frac{\left(\frac{d}{2}\right)^3}{2,5} \phi$$

$$\frac{A l}{d^3} = \frac{\phi E_{kb}}{10 c \rho v^2}$$

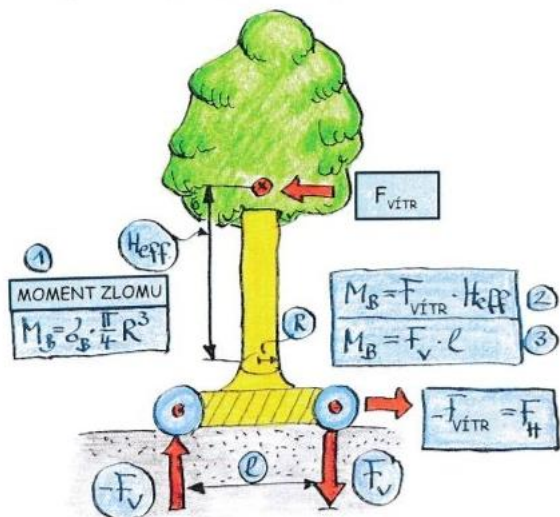
$$\text{Geometrie} = \frac{\text{Materiál}}{\text{Faktory}}$$



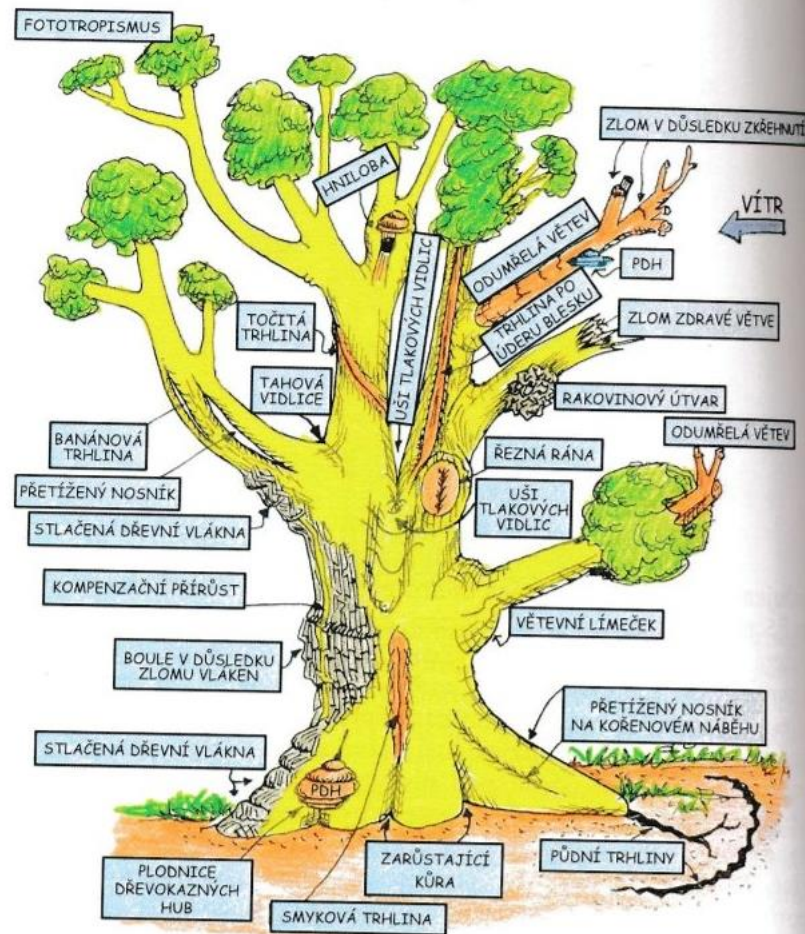
Fakulta lesnická
a dřevařská



Stromový inženýring - analýza limitního zatížení



Na první pohled



Zatížení a růst stromů
vytváří ze dřeva
nevratné varovné signály.
Řeč jejich těla
to však prozradí
jen očím znalých.

Poselství obra,
tiché útěchy v osamělé hodině,
přítele v časech bezradných,
může však vyřknout
slovo osudu,
který pohrbí tělo človíčka
a štěstí jeho rodiny
pod řítící se korunou...

Tvé oči necht' jsou ušima!





Fakulta lesnická
a dřevařská

Děkuji za pozornost

